

## 双电机五桥臂逆变器模型预测同步控制\*

唐永聪 刘涛 耿强

(天津工业大学电工电能新技术天津市重点实验室 天津 300387)

**摘要:**以五桥臂逆变器为控制对象,提出了一种基于模型预测控制策略的双永磁同步电机同步控制策略,与传统算法相比,新算法在价值函数中加入了转矩同步策略,保证了两电机输出功率的均衡,同时将交叉耦合控制思想引入到两电机五桥臂逆变器控制系统的速度外环控制器中,提高了两台电机在参数不匹配情况下的转速同步性能。仿真分析表明,相比传统控制策略,新算法能够在保持模型预测控制算法较高的转矩响应速度的前提下,有效的提高两电机系统转速、转矩的同步性能,具有一定的应用价值。

**关键词:**双永磁同步电动机;五桥臂逆变器;模型预测控制;交叉耦合控制;

**中图分类号:** TP2    **文献标识码:** A    **国家标准学科分类代码:** 470.4057

Model predictive synchronous control for dual PMSM  
motors and five-leg inverter

Tang Yongcong Liu Tao Geng Qiang

(Tianjin Key Laboratory of Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,  
Tianjin Polytechnic University, Tianjin 300387, China)

**Abstract:** In this paper, a five-leg inverter is proposed as a control object, and a cooperative control strategy based on model predictive control strategy is proposed. Compared with the traditional algorithm, the new algorithm adds torque synchronization Strategy to ensure the output power balance of the two motors, while the cross-coupling control thinking into the five-leg two motor control system speed outer loop controller to improve the two motors do not match the parameters of the speed synchronization performance. Simulation results show that the new algorithm can effectively improve the synchronization performance of the motor speed and torque of the two motor systems under the precondition of keeping the torque control speed of the model predictive control algorithm higher than the traditional control strategy, and has certain application value.

**Keywords:** double permanent magnet synchronous motor; five-leg inverter; model predictive control; cross-coupling control

## 0 引言

双电机的协同驱动系统已经开始广泛应用于矿井、冶金、港口等诸多行业,以改善传统单电机驱动可靠性较低,控制性能差,系统机械传动机构复杂,单台电机功率要求较高等问题。

传统的双电机驱动系统中,两台电机分别由两台变频器进行控制,两台电机之间不存在电气耦合。现代先进双电机控制系统将网侧变流器进行合并,实现了共直流母线结构,简化了拓扑结构。为了进一步简化双电机控制系统,一些学者针对逆变侧提出了五桥臂拓扑结构,对比传统的

逆变侧结构,五桥臂逆变器减少了一个桥臂,简化了结构并提高了系统的可靠性,在近年来得到了许多学者的关注<sup>[1-5]</sup>。但是,由于五桥臂逆变器中,两电机公用一个桥臂,因此造成了两电机电气上的耦合,如何在简化拓扑结构的基础上提高两电机的控制性能,是目前的一个研究难点。

针对上述问题,一些学者提出了半周期调制策略以及占空比优化策略<sup>[6-10]</sup>,提高了两电机对直流母线的电压利用率。然而,上述算法虽然改进了调制算法,但并未将功率器件的开关状态与电机的控制目标直接相联系,同时,由于电流环仍采用PI控制器,电机的转矩响应速度较低。

近些年来,随着高性能微处理器的发展,在电机驱动、

电源、新能源领域,模型预测控制以其独有的特点而被得到广泛的关注<sup>[11-15]</sup>。一些学者将模型预测控制应用于五桥臂逆变器,对 $2^5=32$ 种开关状态的电流控制效果进行分别预测,并采用价值函数进行评估和优化,提高了双电机控制系统的转矩响应速度。但是,该类方法并没有针对五桥臂逆变器提出有效的转矩同步控制策略,也未改善两电机速度外环的同步性能。

本文以五桥臂逆变器为控制对象,对模型预测控制策略进行改进,在价值函数中加入了转矩同步策略,保证了两电机输出功率的均衡。同时,为了提高两台电机在参数不匹配情况下的转速同步性能,将交叉耦合控制思想引入到五桥臂两电机控制系统的速度外环控制器中。仿真分析表明,相比传统控制策略,新算法能够在保持模型预测控制算法较高的转矩响应速度的前提下,有效的提高两电机系统转速、转矩的同步性能,具有一定的应用价值。

### 1 五桥臂电压源逆变器拓扑结构与数学模型

五桥臂逆变器的拓扑结构如图 1 所示。

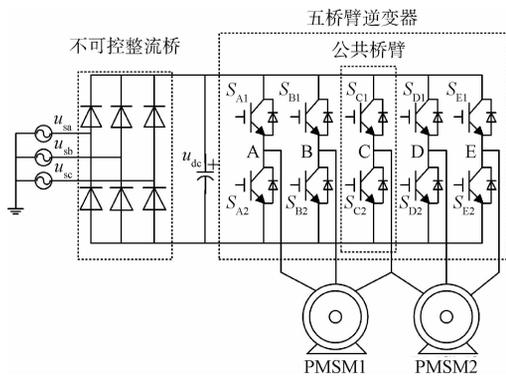


图 1 五桥臂电压源逆变器拓扑结构

图中,右侧为三相电网和不可控整流桥,其中, $u_{sa}$ 、 $u_{sb}$ 、 $u_{sc}$ 为三相电网的各相相电压;直流支撑电容的电压为 $u_{dc}$ ;右侧为五桥臂逆变器的交流桥和两台用于驱动的永磁同步电机 PMSM1、PMSM2,其中,桥臂 A、B、C 用于驱动电机 PMSM1,桥臂 C、D、E 用于驱动电机 PMSM2。可以看出,与传统的逆变器相比,五桥臂结构减少了功率开关器件的数量,两台电机共用了 C 相桥臂。

任一桥臂的开关状态  $S_x$  可以表示为

$$S_x = \begin{cases} 1, & \text{上桥臂开通,下桥臂关断} \\ 0, & \text{下桥臂开通,上桥臂关断} \end{cases} \quad (1)$$

$x = A, B, C, D, E$

由于每个桥臂都有两种开关状态,因此,五桥臂逆变器共有 $2^5=32$ 种开关状态组合,设 $\mathbf{S}=[S_A S_B S_C S_D S_E]$ ,其对应的结果如表 1 所示。

根据各个桥臂的开关状态,可以得到电机三相输入电压与桥臂开关状态的函数关系为

表 1 五桥臂逆变器开关状态组合

$\mathbf{S}$	$[S_A$	$S_B$	$S_C$	$S_D$	$S_E]$
	00000	00001	00010	00011	
	00100	00101	00110	00111	
	01000	01001	01010	01011	
开关	01100	01101	01110	01111	
状态	10000	10001	10010	10011	
	10100	10101	10110	10111	
	11000	11001	11010	11011	
	11100	11101	11110	11111	

$$\begin{bmatrix} u_{AN} \\ u_{BN} \\ u_{CN} \end{bmatrix} = \frac{u_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_A \\ S_B \\ S_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} u_{EN} \\ u_{DN} \\ u_{CN} \end{bmatrix} = \frac{u_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_E \\ S_D \\ S_C \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $u_{AN}$ 、 $u_{BN}$ 、 $u_{CN}$ 为电机 1 的定子相电压, $u_{EN}$ 、 $u_{DN}$ 、 $u_{CN}$ 为电机 2 的定子相电压。

利用 Park 变换,将两台电机的定子电压由三相静止坐标系变换到两相旋转坐标系,变换矩阵为:

$$\mathbf{C}_{3s/2r} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120) & \cos(\theta+120) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta-120) & -\sin(\theta+120) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: $\theta$ 为转子位置的电角度。

利用变换矩阵,可得两台电机  $dq$  轴定子电压分别为:

$$\begin{bmatrix} u_{d1} \\ u_{q1} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{3s/2r} \begin{bmatrix} u_{AN} \\ u_{BN} \\ u_{CN} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} u_{d2} \\ u_{q2} \end{bmatrix} = \mathbf{C}_{3s/2r} \begin{bmatrix} u_{EN} \\ u_{DN} \\ u_{CN} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $u_{d1}$ 、 $u_{q1}$ 为电机 1 的  $dq$  轴电压; $u_{d2}$ 、 $u_{q2}$ 为电机 2 的  $dq$  轴电压。

建立永磁同步电机在两相旋转坐标系下的电压方程:

$$\begin{cases} u_{d1} = R_1 i_{d1} + \frac{d\psi_{d1}}{dt} - \omega_1 \psi_{q1} \\ u_{q1} = R_1 i_{q1} + \frac{d\psi_{q1}}{dt} + \omega_1 \psi_{d1} \\ u_{d2} = R_2 i_{d2} + \frac{d\psi_{d2}}{dt} - \omega_2 \psi_{q2} \\ u_{q2} = R_2 i_{q2} + \frac{d\psi_{q2}}{dt} + \omega_2 \psi_{d2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $R_1$ 、 $R_2$ 为电机 1 和电机 2 的定子电阻; $i_{d1}$ 、 $i_{q1}$ 、 $i_{d2}$ 、 $i_{q2}$ 为两台电机的  $dq$  轴电流分量; $\omega_1$ 、 $\omega_2$ 为两台电机的转子旋转电角速度; $\psi_{d1}$ 、 $\psi_{q1}$ 、 $\psi_{d2}$ 、 $\psi_{q2}$ 为两台电机的  $dq$  轴磁链分量。

其中, $dq$  轴磁链分量表示为:

$$\begin{cases} \psi_{d1} = L_{d1} i_{d1} + \psi_{f1} \\ \psi_{q1} = L_{q1} i_{q1} \\ \psi_{d2} = L_{d2} i_{d2} + \psi_{f2} \\ \psi_{q2} = L_{q2} i_{q2} \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $L_{d1}$ 、 $L_{q1}$ 、 $L_{d2}$ 、 $L_{q2}$  分别为两台电机的  $dq$  轴电感,  $\psi_{f1}$ 、 $\psi_{f2}$  分别为两台电机的转子永磁体磁链。

因此得到电流状态方程为:

$$\begin{cases} \frac{di_{d1}}{dt} = \frac{1}{L_{d1}}(u_{d1} - R_1 i_{d1} + \omega_1 L_{q1} i_{q1}) \\ \frac{di_{q1}}{dt} = \frac{1}{L_{q1}}(u_{q1} - R_1 i_{q1} - \omega_1 L_{d1} i_{d1} - \omega_1 \psi_{f1}) \\ \frac{di_{d2}}{dt} = \frac{1}{L_{d2}}(u_{d2} - R_2 i_{d2} + \omega_2 L_{q2} i_{q2}) \\ \frac{di_{q2}}{dt} = \frac{1}{L_{q2}}(u_{q2} - R_2 i_{q2} - \omega_2 L_{d2} i_{d2} - \omega_2 \psi_{f2}) \end{cases} \quad (9)$$

以第1台发电机为例,忽略发电机定子电阻,将发电机与不控整流电路作为一个整体,可得等效电路如图2所示。

## 2 模型预测转矩同步控制策略

采用欧拉法将式(9)离散化,可得:

$$\begin{cases} i_{d1}(k+1) = i_{d1}(k) + \frac{T}{L_{d1}}[u_{d1}(k) - R_1 i_{d1}(k) + L_{q1} \omega_1(k) i_{q1}(k)] \\ i_{q1}(k+1) = i_{q1}(k) + \frac{T}{L_{q1}}[u_{q1}(k) - R_1 i_{q1}(k) - L_{d1} \omega_1(k) i_{d1}(k) - \psi_{f1} \omega_1(k)] \\ i_{d2}(k+1) = i_{d2}(k) + \frac{T}{L_{d2}}[u_{d2}(k) - R_2 i_{d2}(k) + L_{q2} \omega_2(k) i_{q2}(k)] \\ i_{q2}(k+1) = i_{q2}(k) + \frac{T}{L_{q2}}[u_{q2}(k) - R_2 i_{q2}(k) - L_{d2} \omega_2(k) i_{d2}(k) - \psi_{f2} \omega_2(k)] \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可以看到,通过  $k$  时刻的电流、转速、以及定子电压,可以预测  $k+1$  时刻的电流,因此电流预测式为:

$$\begin{cases} i_{d1}^p(k+1) = i_{d1}(k) + \frac{T}{L_{d1}}[u_{d1}(k) - R_1 i_{d1}(k) + L_{q1} \omega_1(k) i_{q1}(k)] \\ i_{q1}^p(k+1) = i_{q1}(k) + \frac{T}{L_{q1}}[u_{q1}(k) - R_1 i_{q1}(k) - L_{d1} \omega_1(k) i_{d1}(k) - \psi_{f1} \omega_1(k)] \\ i_{d2}^p(k+1) = i_{d2}(k) + \frac{T}{L_{d2}}[u_{d2}(k) - R_2 i_{d2}(k) + L_{q2} \omega_2(k) i_{q2}(k)] \\ i_{q2}^p(k+1) = i_{q2}(k) + \frac{T}{L_{q2}}[u_{q2}(k) - R_2 i_{q2}(k) - L_{d2} \omega_2(k) i_{d2}(k) - \psi_{f2} \omega_2(k)] \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $i_{d1}^p(k+1)$ 、 $i_{q1}^p(k+1)$ 、 $i_{d2}^p(k+1)$ 、 $i_{q2}^p(k+1)$  表示  $k+1$  时刻的预测电流。

保证  $d$  轴磁链与  $q$  轴磁链相互垂直,从而获得最大电磁转矩,设电流参考值  $i_{d1}^* = i_{d2}^* = 0$ ,则当控制系统达到稳态时,有  $i_{d1} = i_{d2} = 0$ ,考虑电磁转矩的计算式,同时结合式(8),有:

$$\begin{cases} T_{em1} \propto \psi_{f1} i_{q1} \\ T_{em2} \propto \psi_{f2} i_{q2} \end{cases} \quad (12)$$

价值函数  $g(k+1)$  的表达式如下:

$$\begin{aligned} g(k+1) = & h_{d1} |i_{d1}^*(k+1) - i_{d1}^p(k+1)| + \\ & h_{q1} |i_{q1}^*(k+1) - i_{q1}^p(k+1)| + \\ & h_{d2} |i_{d2}^*(k+1) - i_{d2}^p(k+1)| + \\ & h_{q2} |i_{q2}^*(k+1) - i_{q2}^p(k+1)| + \\ & h_T |\psi_{f1} i_{q1}^p(k+1) - \psi_{f2} i_{q2}^p(k+1)| \end{aligned} \quad (13)$$

式中:  $h_{d1}$ 、 $h_{q1}$ 、 $h_{d2}$ 、 $h_{q2}$  分别两台电机  $dq$  轴电流的权值系数,  $h_T$  为转矩同步性能权值系数。

在式(13)的价值函数表达式中,前4项体现了电机实际电流与电流参考值之间的跟踪误差;最后一项表示了两台电机电磁转矩之间的同步误差。

控制算法的目标为尽可能地减少电流误差和转矩同步误差,因此有:

$$S(k) = \underset{n=1}{\overset{32}{\operatorname{argmin}}} [g(k+1)] \quad (14)$$

在  $k+1$  时刻,将表1中32种开关状态代入电流预测式进行计算,将得到的预测电流会得出32种不同的价值函数结果,数值越小,说明预测电流跟踪给定电流的性能就越好,越接近给定值,控制精度就越高。将得到最小价值函数结果的开关状态组合作为  $k$  时刻五桥臂逆变器的开关状态进行输出。

五桥臂逆变器模型预测控制框图如图2所示。

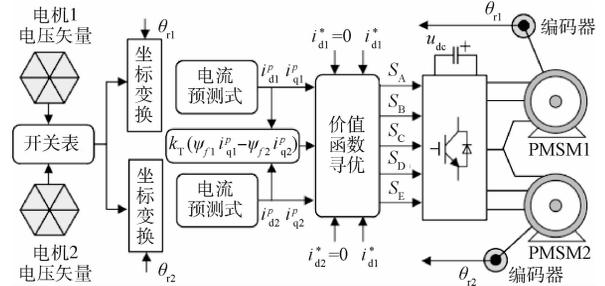


图2 五桥臂逆变器模型预测控制框图

## 3 交叉耦合控制模型的设计

为了保证两台电机转速同步,引入交叉耦合控制策略。两电机系统采用交叉耦合算法后,两电机的电流补偿值(交叉耦合算法的输出值)  $e_1^*$ 、 $e_2^*$  为:

$$\begin{cases} e_1^* = (e_2 C_2 - e_1 C_1) \left[ k_p + \frac{k_i}{s} \right] C_1 \\ e_2^* = (e_2 C_2 - e_1 C_1) \left[ k_p + \frac{k_i}{s} \right] C_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $e_1$ 、 $e_2$  为两电机各自的转速误差值;  $k_p$ 、 $k_i$  为交叉耦合

控制器比例、积分系数;  $C_1$ 、 $C_2$  为输入误差放大系数。

采用交叉耦合算法的两电机模型预测控制系统的框图如图 3 所示。

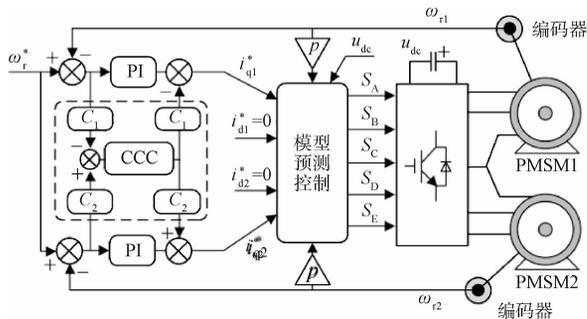


图 3 两电机模型预测控制系统框图

图中,两台电机的速度误差经过各自的输入放大系数  $C_1$ 、 $C_2$  将误差放大,然后将输出结果作差得到两电机的同步误差信号,将其输入交叉耦合控制器(CCC)得到补偿量,并将其经过放大系数  $C_1$  和  $C_2$ ,得到最终的输出补偿量注入到各电机的  $q$  轴电流参考值中,提高两台电机的速度同步性能。

#### 4 仿真实验与分析

利用 MATLAB/Simulink 建立两台永磁同步电机以及五桥臂逆变器控制系统的数学模型。两电机的额定功率均为 4 kW,同时,两电机包括电阻、电感在内的电气参数均相同。所不同之处在于,两电机的转动惯量之比约为 1:2。

加入转矩同步算法前后,两台电机的电磁转矩误差波形如图 4 所示。

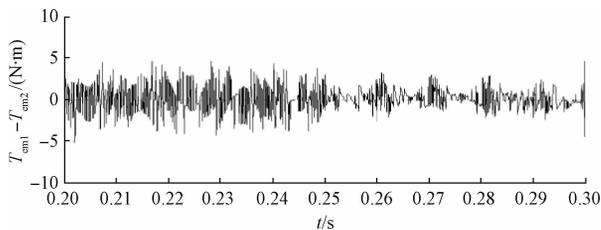


图 4 电磁转矩误差对比

由图中可以看到,在未加入转矩同步算法前,两电机的电磁转矩误差较大,波动幅值接近  $5 \text{ N} \cdot \text{m}$ ;在 0.25 s 加入转矩同步算法后,两电机的电磁转矩误差明显减小,波动幅值小于  $2.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ ,同时平均误差也得到了大幅削弱。

加入交叉耦合算法前后,两电机在启动过程中的转速误差波形如图 5 所示。

由图中可以看到,由于两电机转动惯量不同,不采用交叉耦合控制时,两电机无法保持速度同步,转动惯量小的电机加速快,转动惯量大的电机加速慢;加入交叉耦合控制后,可以看到,两台电机保持了速度同步。

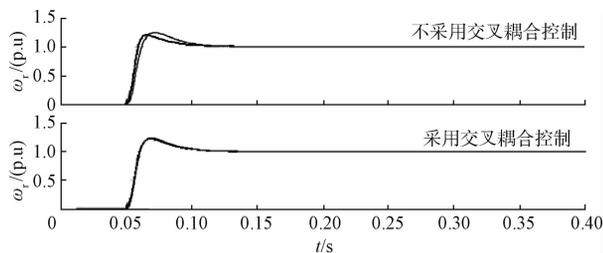


图 5 转速误差对比

#### 5 结 论

本文针对传统五桥臂双电机控制系统转矩、转速同步性能较差的缺点,采用有限状态模型预测控制算法以提高两电机的转矩响应速度,同时,在价值函数中加入转矩同步分量,通过开关矢量的寻优过程,提高两台电机的转矩同步性能;在此基础上,在转速控制环加入交叉耦合算法,提高两电机转速同步性能。仿真分析结果证明了算法的有效性。

#### 参考文献

- [1] 谷鑫,姜勃,耿强,等. 双永磁同步电机五桥臂逆变器模型预测控制[J]. 电工电能新技术, 2015, 34(12):25-30.
- [2] 易子琛. 基于五桥臂逆变器的双异步电机调速系统模型预测控制研究[D]. 北京:北方工业大学, 2015.
- [3] 耿强,张必军,史婷娜,等. 五桥臂电压源逆变器两永磁同步电机驱动的研究[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(10):7-11.
- [4] 梅杨,易子琛,王立朋,等. 基于有限状态机的五桥臂逆变器改进调制策略[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(10):21-26.
- [5] 张必军. 五桥臂电压源逆变器两永磁同步电机控制系统的研究[D]. 天津:天津大学, 2014.
- [6] OKA K, NOZAWA Y, MATSUSE K. An improved method of voltage utility factor for PWM control of a five-leg inverter in two induction motor drives[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2006, 1(1): 108-111.
- [7] DIXIT A, MISHRA N, SINHA S K, et al. A review on different PWM techniques for five leg voltage source inverter[C]. IEEE Transactions on Advances in Engineering, Science and Management (ICAESM), International Conference, 2012: 421-428.
- [8] 刘少军,张思雨. 基于 DSP 控制的永磁同步电机变频调速系统的设计[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(1):84-88.
- [9] 刘洋,张斌,吴庆林,等. 基于 DSP 的永磁同步电动机

- 机控制系统设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(1): 88-92.
- [10] 郭三明, 孙鹏荆. 基于占空比优化的 STATCOM 预测功率控制策略[J]. 计算机工程与应用, 2015, 51(8): 240-244.
- [11] 邱忠才, 肖建, 郭冀岭, 等. 永磁同步电机速度预测电流解耦控制[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(5): 648-654.
- [12] 段向军, 王宏华, 王钧铭. 预测控制在电力电子变流器中的应用综述[J]. 测控技术, 2015, 34(10): 1-5.
- [13] 宋文胜, 邓知先. 单相 PWM 整流器定频模型预测功率控制算法[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(4): 93-100.
- [14] 齐美星, 童敏明. 永磁同步电机转矩脉动占空比最优控制方法[J]. 电气传动, 2015, 45(1): 14-18.
- [15] 史婷娜, 张必军, 刘涛, 等. 五桥臂逆变器驱动的双永磁同步电机系统占空比优化调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1498-1507.

### 作者简介

**唐永聪**, 1994 年出生, 本科, 主要研究方向为多电机控制。

**刘涛**, 1984 年出生, 工学博士, 讲师, 主要研究方向为多电机控制。

**耿强**, 1978 年出生, 工学博士, 副教授, 主要研究方向为多电机控制等。

E-mail: taoliu@tju.edu.cn